

# APLIKASI STRUKTUR SHELL PADA SYDNEY OPERA HOUSE

Haryanto \*)

## Abstraksi

Sydney opera house, dengan rancangan yang futuristik dan hightect inovatif merupakan suatu bentuk tantangan dalam bidang arsitektur yang berhasil diwujudkan. Keberhasilan ini telah menghadirkan suatu motivasi dalam dunia arsitektur masa depan dengan menghadirkan karya arsitektur yang mengagumkan. Dirancang oleh arsitek Denmark Jorn Utzon pada tahun 1959 selama 14 tahun ini terbentang di atas tanah seluas 1,8 Ha dengan ketinggian atap mencapai 67 m diatas permukaan laut dengan desain “spherical geometry” yang terdiri dari 2.194 bagian beton pre-cast. Shell yang dipakai pada atap Sydney Opera House merupakan shell free form. Dimana bentuk shell yang ada tidak mengikuti pola geometri tetapi terikat secara struktural. Meskipun bentuk geometri tetap ada tetapi bukan merupakan factor utama. Gaya-gaya yang dialami struktur shell ini tetap diperhitungkan sesuai dengan kaidah strukturalnya. Namun tidak membatasi arsiteknya dalam mengeksplorasi ide dan gagasan dalam berkarya. Hal tersebut tercermin dalam desain Sydney opera house yang mampu menjadi inspirasi dalam karya-karya arsitektur selanjutnya.

**Kata Kunci : Struktur Shell, Bangunan bentang lebar**

## PENDAHULUAN

Definisi struktur dalam konteks hubungannya dengan bangunan adalah sebagai sarana untuk menyalurkan beban dan akibat penggunaannya dan atau kehadiran bangunan ke dalam tanah (*Scodek, 1998*). Terdapat lima golongan bentuk struktur (*Sutrisno, 1983*), yaitu struktur massa, struktur rangka, struktur permukaan bidang (struktur lipatan dan cangkang), struktur kabel dan biomorfik. Bentuk struktur permukaan bidang yang merupakan struktur cangkang atau shell, di alam dapat ditemukan pada bentuk perisai dari tumbuh-tumbuhan maupun binatang, meskipun bentuknya tipis, tapi kuat dan kokoh. Seperti kulit labu yang kering, kulit

telur, kulit kerang dan tempurung kepala kita. Ciri-ciri dari perisai yang kokoh adalah bentuknya yang lengkung dan berbahan keras dan padat. Pengertian ini oleh manusia diwujudkan sebagai struktur cangkang. Pernyataan dari pengertian alam tersebut menjadi suatu struktur buatan manusia. Meskipun terdapat ikatan-ikatan yang membatasinya, abad demi abad manusia akhirnya mampu melonggarkan batasan tersebut seiring dengan kemajuan teknologi. Karenanya pada masa kini bentuk yang dihasilkan dalam struktur cangkang masih harus berbentuk geometrik yang dapat dimengerti dan diterjemahkan dalam kemampuan matematis untuk dapat

---

\*) Ir. (UNDIP), MSA (ITB) Staf Pengajar Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang

dilaksanakan. Pada dasarnya bentuk-bentuk struktur adalah persamaan antara fungsi, material, dan hukum-hukum statis.

Cangkang pada umumnya menerima beban merata yang dan dapat menutup ruangan besar dibandingkan dengan tipisnya pelat cangkang tadi. Oleh karena itu struktur cangkang paling baik digunakan pada bangunan dengan bentang besar tanpa pembagian pada interior seperti stadion, stasiun, pasar, masjid exhibition hall, dan bangunan bentang besar lainnya.

Bangunan dengan struktur cangkang yang akan dibahas adalah Sydney Opera House, dibangun pada tahun 1957 di Bennelong point. Dibuka pertama kali oleh Ratu Elizabeth II pada tahun 1973. Bangunan ini digunakan untuk pertunjukan teater, musik, opera, tari modern, ballet, pameran dan film. Sydney Opera House merupakan bangunan dengan struktur cangkang berbentuk spherical geometry dengan bentang kurang lebih 185 m dan 120 m yang terdiri dari ruang-ruang sebagai berikut:

- Concert Hall
- Opera Theatre
- Drama Theatre
- Playhouse, studio, reception hall, foyer
- Studio latihan
- Restoran

#### ▪ Ruang ganti

Ruang-ruang yang sangat kompleks dihubungkan dengan baik di bawah atap shell.

### PENGERTIAN SHELL

Menurut *Joedicke (1963)* struktur shell adalah plat yang melengkung ke satu arah atau lebih yang tebalnya jauh lebih kecil daripada bentangnya. Sedangkan menurut *Schodeck (1998)*, shell atau cangkang adalah bentuk struktural tiga dimensional yang kaku dan tipis yang mempunyai permukaan lengkung. Sejalan dengan pengertian di atas, menurut *Ishar (1995)*, cangkang atau shell bersifat tipis dan lengkung. Jadi, struktur yang tipis datar atau lengkung tebal tidak dapat dikatakan sebagai shell. Istilah cangkang oleh *Salvadori dan Levy (1986)* disebut kulit kerang. Sebuah kulit kerang tipis merupakan suatu membran melengkung yang cukup tipis untuk mengerahkan tegangan-tegangan lentur yang dapat diabaikan pada sebagian besar permukaannya, akan tetapi cukup tebal sehingga tidak akan menekuk di bawah tegangan tekan kecil, seperti yang akan terjadi pada suatu membran ideal. Di bawah beban, suatu kulit kerang tipis adalah stabil di setiap beban lembut yang tidak menegangkan pelat secara berlebihan, karena kulit kerang tidak perlu merubah bentuk

untuk menghindari timbulnya tegangan-tegangan tekan.

### Sifat-Sifat Lokal Permukaan Kulit Kerang

Dalam usaha untuk memperoleh suatu pengertian yang sempurna mengenai kelakuan struktural dari struktur-struktur lengkung dua dimensi, seperti membran dan kulit kerang adalah penting untuk pertama kalinya mengenali sifat-sifat geometris dari permukaan mereka. sifat-sifat ini dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu:

- a. Sifat-sifat lokal, yang menentukan geometri dari permukaan segera sekitar suatu titik
- b. Sifat-sifat umum, yang menerangkan bentuk dari permukaan sebagai suatu keseluruhan.

Permukaan-permukaan dibagi kedalam tiga kategori yang berbeda tergantung kepada variasi dari kelengkungan mereka disekitar satu titik:

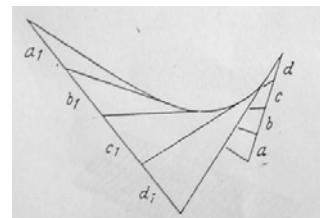
1. Kalau kelengkungan pada suatu titik dalam semua arah mempunyai tanda sama, maka permukaan disebut sinklastik pada titik tersebut .



Gambar 1. Tampak Sydney Opera House

Kalau kelengkungan pada suatu titik dalam semua arah mempunyai tanda yang sama kecuali pada satu arah, yaitu nol, maka permukaan itu disebut juga dapat direbahkan (developable) pada titik tersebut.

2. Kalau kelengkungan pada suatu titik adalah positif dalam arah-arah tertentu dan negatif dalam arah-arah lainnya, permukaan disebut sebagai antiklastik atau suatu permukaan pelana (saddle surface) pada titik tersebut.



Gambar 2. Kelengkungan permukaan Shell

### Kalsifikasi Shell

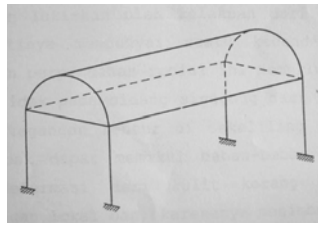
Menurut Ishar (1995), struktur shell dibagi kedalam beberapa kategori, yaitu:

- Shell silindrical

- Shell rotasi
- Shell conoida
- Shell hyperbolis parabola
- Shell dengan bentuk bebas (free form shell)

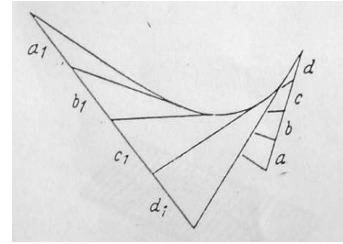
Sedangkan menurut Joedicke (1963), bentuk struktur shell dibagi menurut tipe kelengkungan permukaannya sebagai berikut:

1. Singly curved shell, terbentuk dari perpindahan garis lurus yang melebihi bentuk lengkung



Gambar 3. Bentuk Singly curved shell

2. Doubly curved shell with principle curves in the same direction (domical shell) dibentuk dengan memutar bidang lengkung terhadap sumbu pada bidang tersebut dan membentuk lengkungan kearah sumbunya.
3. Doubly curved shell with principle curves in opposite direction (hiperbolik paraboloid)



Gambar 4. Hiperbolic Paraboliid

4. Doubly curved shell with principle curve in the same and opposite direction yang memberikan contoh prinsip- prinsip alternatif arah lengkungan.

#### Teori Dan Analisa Desain Cangkang

Kulit kerang yang tipis dapat memikul suatu beban lembut dengan tegangan- tegangan membran, dan bahwa tegangan- tegangan membran, yang dikerahkan didalam suatu kulit kerang terutama tergantung kepada kondisi- kondisi tumpuan perbatasannya. Syarat- syarat yang harus dipenuhi untuk menimbulkan tegangan membran murni didalam sebuah kulit kerang, antar lain:

- Gaya- gaya reaktif pada perbatasan kulit kerang harus sama dan berlawanan dengan gaya- gaya membran pada perbatasan yang ditimbulkan oleh beban
- Tumpuan harus mengijinkan perbatasan kulit kerang untuk mengalami perindahan yang ditimbulkan oleh regangan membran

Kalau salah satu atau keduanya tidak terpenuhi, maka akan timbul tegangan lentur didalam kulit kerang yang disebabkan oleh:

1. Gaya meridional, merupakan gaya internal pada cangkang aksimetris yang terbagi rata dan dinyatakan dalam gaya per satuan luas.
2. Gaya- gaya melingkar, dinyatakan sebagai gaya persatuan panjang yang dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan dalam arah transversal.
3. Distribusi gaya, distribusi gaya melingkar dan meridional dapat diperoleh dengan memplot persamaan kedua gaya tersebut. Gaya meridional selalu bersifat tekan, sementara gaya melingkar mengalami transisi pada sudut  $51^{\circ}49'$  diukur dari garis vertikal diukur dari garis vertikal.
4. Gaya terpusat, beban ini harus dihindari dari struktur cangkang.
5. Kondisi tumpuan, kondisi ini sangat mempengaruhi perilaku dan desain struktur. Secara ideal tumpuannya tidak boleh menimbulkan momen lentur pada permukaan cangkang. Jadi kondisi jepit harus dihindari. Menggunakan hubungan sendi sama saja dengan memberikan gaya pada tepi cangkang, yang berarti akan menimbulkan momen lentur.

6. tegangan membran didalam kulit kerang tipis, merupakan suatu membran melengkung yang cukup tipis untuk mengarahkan tegangan- tegangan lentur yang dapat diabaikan pada sebagian besar permukaannya, akan tetapi cukup tebal sehingga tidak akan menekuk di bawah tegangan- tegangan tekan kecil, seperti yang akan terjadi pada suatu membran ideal. Di bawah beban, suatu kulit kerang tipis mengarahkan tegangan- tegangan membran, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan dan tegangan geser singgung. Suatu kulit kerang tipis adalah stabil di bawah setiap beban lembut yang tidak menegangkan pelat secara berlebihan, karena kulit kerang tidak perlu merubah bentuk untuk menghindari timbulnya tegangan- tegangan tekan.

Suatu kulit kerang harus ditumpu dengan selayaknya. Suatu tumpuan layak adalah suatu tumpuan yang :

- (a) mengarahkan reaksi-reaksi membran, yaitu reaksi-reaksi yang bekerja dalam bidang yang menyinggung kulit kerang pada perbatasan dan
- (b) memungkinkan perpindahan – perpindahan membran yang pada perbatasan

kulit kerang , yaitu perpindahan-perpindahan yang di timbulkan oleh regangan-regangan akibat tegangan-tegangan membran.

Apabila reaksi-reaksi tumpuan tidak pada bidang singgung kulit kerang atau kalau perpindahan –perpindahan membran dihalangi oleh tumpuan-tumpuan, maka kulit kerang akan mengarahkan tegangan-tegangan lentur perbatasan. Kalau bentuk kulit kerang dan kondisi –kondisi tumpuan, kedua-duanya dipillih secara tidak tepat, maka kulit kerang mungkin akan mengarahkan tegangan-tegangan lentur meliputi seluruh permukaannya. “kulit kerang” yang didesain secara tidak tepat semacam ini tidak dapat bekerja sebagai kulit kerang tipis, jadi tidak mampu sebagian terbesar dari beban melalui tegangan-tegangan membran.

### Material

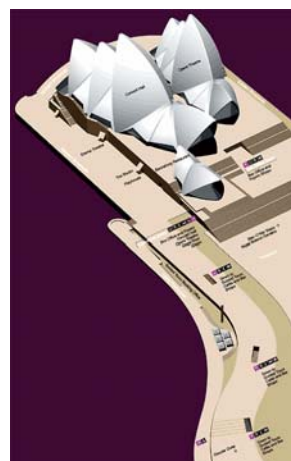
Menurut Salvadori dan Levy (1986 ), kulit kerang tipis atau cangkang terbuat dari bahan-bahan seperti logam, kayu, dan plastik yang mampu menahan tegangan tekan dan ada kalanya tegangan tarik. Akan tetapi beton bertulang merupakan suatu bahan ideal untuk struktur kulit kerang tipis karena mudahnya beton dituang atau dibentuk menjadi bentuk-bentuk lengkung.

### SYDNEY OPERA HOUSE



Gambar 5. Tampak Sydney Opera House

Dibangun di kawasan Benellong Point diatas teluk Sydney yang dulunya difungsikan sebagai gudang penyimpanan kereta trem. oleh Jorn Utzon diubah menjadi suatu mahakarya yang indah dan dikenang sepanjang masa pada tahun 1957 untuk memenuhi ambisi pemerintah setempat.

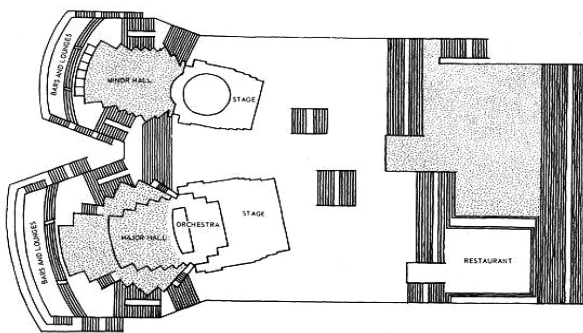


Gambar 6. Susunan keramik Swedia yang melapisi atap



Gambar 7. Proses pembangunan yang memakan waktu 14 tahun

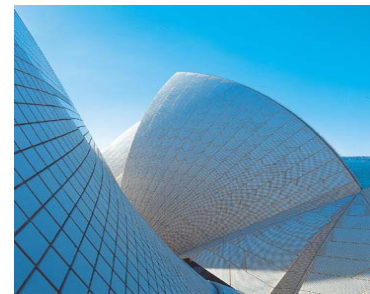
Karena pada waktu itu Sydney tidak memiliki gedung pertunjukan yang memadai. Sydney Opera House berdiri di atas tanah seluas 2,2 Ha dan luas bangunan 1,8 Ha dengan bentang bangunan 185 m x 120 m dan ketinggian atap mencapai 67 meter di atas permukaan laut. Atap terbuat dari 2194 bagian beton precast yang masing-masing seberat 15,5 ton.



Gambar 8. Denah Sydney Opera House

Kesemuanya disatukan dengan kabel baja sepanjang 350 km. Berat atap keseluruhan mencapai 27.230 ton yang

dilapisi 1. 656. 056 keramik Swedia. Berat bangunan 161.000 ton ditopang oleh 580 konstruksi baja yang ditanam pada kedalaman 25 m di bawah permukaan laut. Penyangga atap terdiri dari 32 kolom beton yang masing-masing 2,5 meter persegi dengan struktur dinding



Gambar 9. Atap yang dilapisi keramik swedia

curtain wall. Sydney Opera House memiliki lebih dari 1000 ruang yang diantaranya adalah:

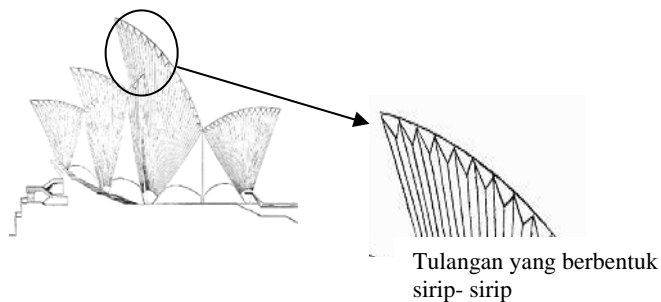
1. Concert Hall, merupakan ruang utama terbesar dengan kapasitas 2679 orang.
2. Opera Theatre, terdiri dari 1547 kursi.
3. Drama Theatre, dengan kapasitas 544 orang.
4. Playhouse, Studio, Reception Hall, Foyer, digunakan untuk seminar, kuliah, dengan kapasitas 398 orang.
5. Lima Auditorium, lima studio,

empat restaurant, enam bar theatre, 60 ruang ganti, perpustakaan, kantor administrasi dan ruang utilitas.

### TINJAUAN STRUKTUR SHELL PADA SYDNEY OPERA HOUSE

Atap pada merupakan bentuk metafora dengan menerapkan system shell free form. Dimana bentuk shell yang ada tidak mengikuti pola geometri tetapi terikat secara structural yang dalam hal ini bentuk geometri tetap ada tetapi bukan merupakan factor utama..

Shell pada Sydney opera house terbentuk dari proses rotasional kearah vertical dengan lengkung dua arah (vertical dan horizontal)/ double curved shell dengan permukaan lengkung sinklastik.

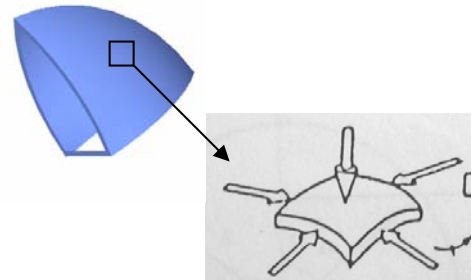


Gambar 10. Jumlah komponen vertikal dari gaya meredional dalam bidang yang timbul secara internal didalam cangkang sama dengan beban mati dan hidup vertikal

Gaya- gaya yang bekerja pada pada tap shell Sydney opera house antara lain adalah:

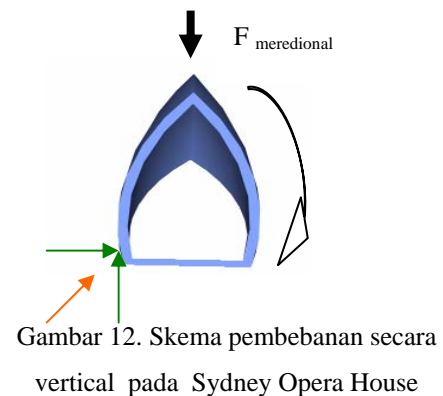
#### 1. Gaya meredional,

Gaya meredional pada atap Sydney opera house berasal dari berat itu sendiri yang kemudian gaya itu disalurkan melalui tulangan baja



Gambar 11. Skema pembebanan pada shell di Sydney Opera House

kekolom penyangga atap. Gaya meredional yang bekerja pada atap diatasi dengan mempertebal permukaan dan membentuk permukaannya menyerupai sirip- sirip dengan tujuan agar permukaan lebih kaku



Gambar 12. Skema pembebanan secara vertical pada Sydney Opera House

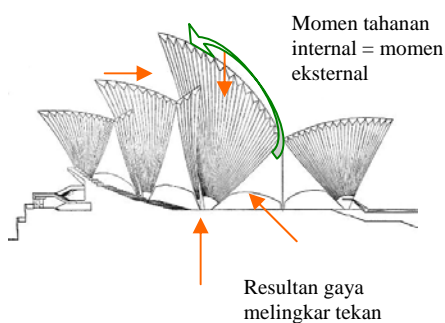


## 2. Gaya rotasional,

Gaya rotasional bekerja ke arah vertikal mengikuti lengkung atap kemudian beban disalurkan ke tanah melalui tiga kolom yang ada. Beban tekan dan tarik disalurkan melalui tulangan atap.

## 3. Beban lentur

Pertemuan atap dan dinding dibuat lebih tebal agar dapat menyokong gaya yang bekerja pada arah vertikal dan horizontal dari gaya meridional, yang juga agar dapat menahan gaya dorong keluar yang terjadi.



Gambar 13. Momen yang terjadi pada Struktur Sydney Opera House

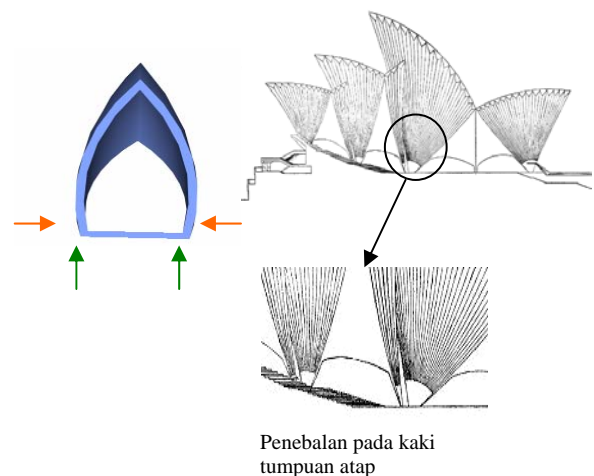
## 4. Kondisi tumpuan

Kondisi tumpuan pada atap Sydney opera house sudah memenuhi syarat tumpuan layak yang diizinkan untuk shell struktur, yaitu :

- tumpuan yang disalurkan ke kolom mampu mengarahkan reaksi dari membrane baik itu

reaksi tekan maupun tarik. Perpindahan gaya tekan tarik yang bekerja pada permukaan cangkang.

- Perpindahan- perpindahan membrane pada perbatasan kulit kerang yang timbul akibat tegangan dan regangan membrane diatasi dengan memperkuat sudut- sudut pertemuan permukaan shell



Gambar 14. Regangan dan tegangan yang terjadi pada tumpuan atap

## KESIMPULAN

Tegangan- tegangan membrane yang terjadi sedemikian kecil sehingga dalam kasus Sydney Opera House, ketebalan kulit kerang ditentukan oleh gangguan- gangguan lentur perbatasan, meskipun demikian tegangan-

tegangan yang ada harus tetap dievaluasi dalam usaha untuk:

1. Tegangan- tegangan tarik yang mungkin terjadi dan menyediakan tulangan tarik yang cukup kuat disepanjang lengkungan atap
2. Tegangan tekan tertinggi terjadi pada puncak atap yang diselesaikan dengan membuat perkuatan. Sedangkan untuk tekanan tekuk terjadi pada sudut pertemuan atap

#### Daftar Pustaka

1. Candela, The Shell Builder, Colin Faber Reinhold Publishing Corp, New York
2. Ishar, H.K; 1995, Pedoman Umum Merancang Bangunan, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
3. Joedicke, Jurgen, 1963, Shell Architecture, Reinhold Publishing Corporation, New York
4. Schodeck, Daniel L; 1980, Structure, USA Prantise Hall- Inc
5. Sutrisno, R; 1983, Bentuk Struktur Bangunan Dalam Arsitektur Modern, Gramedia, Jakarta
6. Salvadori, Mario, M. Levy, 1986, Desain Struktur Dalam Arsitektur (Terjemahan), Erlangga, Jakarta
7. [www.greatbuildings.com](http://www.greatbuildings.com)
8. [www.sydneyoperahouse.com](http://www.sydneyoperahouse.com)